

УДК 543.27

С.В. Авраменко (асп.), В.П. Тарасюк (канд. техн. наук, доц.)
Донецкий национальный технический университет, г. Донецк
кафедра электронной техники
E-mail: svetikkrasota@mail.ru, vita_post@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА УРОВНЯ ЖИДКОСТИ В БАРАБАНЕ КОТЛА

Рассмотрены актуальность мониторинга уровня жидкости в барабане котла и существующие средства измерения уровня. Определены факторы, влияющие на точность измерения уровня: перепад давления, температура и разность плотностей воды и газа. Предложена структурная схема компьютерной системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла с учетом влияния компенсирующих факторов.

Ключевые слова: энергооборудование, дифманометр, парогенератор, циркуляция воды, уравнительный сосуд, коррекция, температура насыщения.

Общая постановка проблемы

Эффективная эксплуатация барабанных парогенераторов в условиях теплоэлектростанций и теплоэлектростанций может осуществляться при условии строго поддержания уровня воды в барабане в некоторых допустимых пределах. Для уменьшения затрат на внеочередные пуски и ремонтные работы котлоагрегата при аварийных остановах необходим оперативный контроль уровня воды в барабане современных мощных парогенераторов, имеющих весьма ограниченный запас воды. Это является важной и актуальной задачей при их эксплуатации [1].

Постановка цели и задачи

Одним из основных требований, предъявляемых к энергооборудованию, является высокая надежность и большой ресурс, что определяет экономические показатели энергоустановок. Разработка оборудования минимально возможных габаритов и массы приводит к его высокой теплонпряженности. К наиболее дорогим, сложным и функционально необходимым элементам оборудования относятся парогенераторы, основой которых является толстостенный барабан котла.

Существующие системы контроля уровня воды в барабане парогенераторов с малой паропроизводительностью и низким давлением пара в барабане основаны на непосредственном наблюдении за уровнем по водомерному устройству. В этом случае применяют показывающие дифманометры-уровнемеры [1]. Их недостатком является то, что сразу после продувки, уровень в водомерной колонке значительно выше исходного. По мере охлаждения воды, уровень приближается к начальному. Температура в барабане может изменяться от (450–550) °С на выходе до (200–300) °С на входе. Уменьшение температуры питательной воды на 100 °С при неизменной нагрузке котла и коэффициенте избытка воздуха приводит к росту температуры перегретого пара на (25–30) °С, следовательно он может находиться за пределами видимости водомерной колонки. Т.е. уровень в барабане может быть на (10–30) мм выше уровня в колонке, что может привести к аварийной ситуации. Разность этих уровней зависит от исходного уровня, изменения температуры и давления в барабане. Графики (см. рис. 1) показывают, что с увеличением исходного уровня и с изменением температуры или давления в барабане разность уровней в барабане и водомерной колонке возрастает при одинаковых исходных уровнях. Очевидно, что подходить к оценке уровня в барабане необ-

ходимо не как одно-, а многозвенному параметру. Соответственно контроль уровня должен осуществляться при помощи многопараметрического комплекса средств измерения.

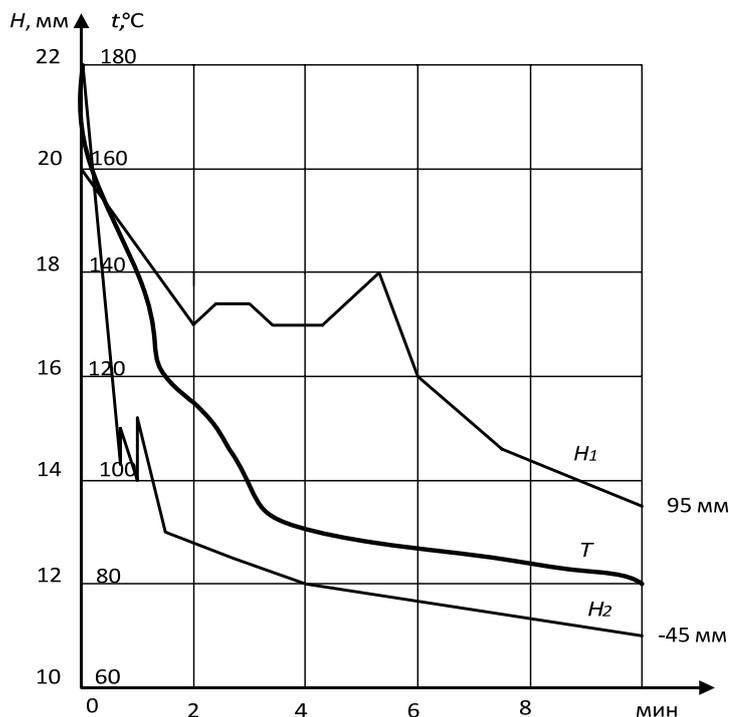


Рисунок 1 — Изменение уровня H и температуры T в водомерной колонке во времени после ее продувки при стабильном давлении и начальных значениях уровня: $H_1=95\text{ мм}$, $H_2=45\text{ мм}$

Целью работы является обеспечение контроля уровня жидкости в барабане котла тепловой электростанции, путем многопараметрического измерения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие основные задачи:

- определить факторы, влияющие на точность измерения уровня;
- провести анализ существующих методов и средств измерения уровня в барабане котла;
- проанализировать существующие математические модели процесса измерения уровня в барабане котла с учетом всех дестабилизирующих факторов;
- разработать структурную схему системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла и алгоритм ее функционирования.

Основная часть

Регулирование питания котельных агрегатов и регулирование давления в барабане котла главным образом сводится к поддержанию баланса между отводом пара и подачей воды. Параметром, характеризующим баланс, является уровень воды в барабане котла (см. рис.2). Надежность работы котельного агрегата во многом определяется качеством регулирования уровня. При повышении давления, снижение уровня ниже допустимых пределов, может привести к нарушению циркуляции в экранных трубах, в результате чего произойдет повышение температуры стенок обогреваемых труб и их пережог. Повышение уровня также ведет к аварийным последствиям, так как возможен заброс воды в пароперегреватель, что вызывает выход его из строя.

В связи с этим, к точности поддержания заданного уровня предъявляются очень высокие требования. Низший уровень воды должен быть не менее чем на 25 мм выше нижней видимой кромки стекла водоуказателя, а высший уровень — не менее, чем на 25 мм ниже верхней видимой кромки водоуказателя (сверх этого уровня нельзя накачивать воду в котел

во избежание выброса воды в паропровод). Расстояние между высшим и низшим уровнями выбирают от 50 до 100 мм (в зависимости от размеров котла).

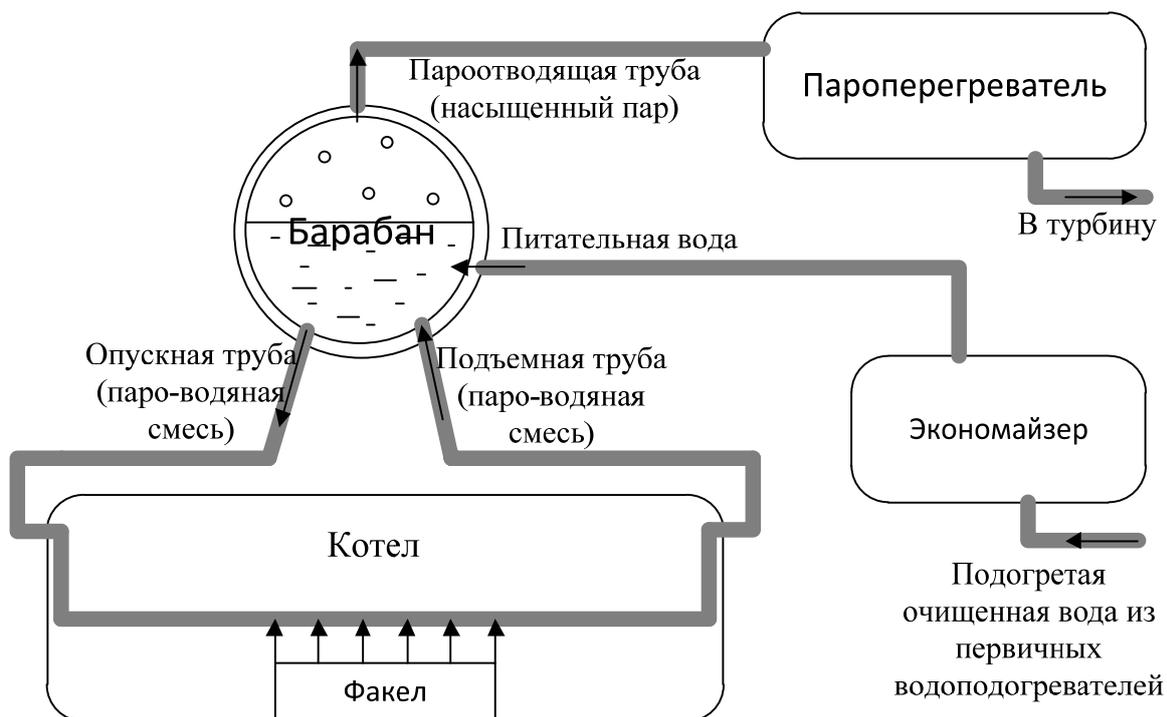


Рисунок 2 — Циркуляция воды в барабанном котле с естественной циркуляцией

Качество регулирования питания также определяется равенством подачи питательной воды. Необходимо обеспечить равномерное питание котла водой, так как частые и глубокие изменения расхода питательной воды могут вызвать значительные температурные напряжения в металле экономайзера.

Контроль соотношения газ-воздух необходим с точки зрения физико-экономических характеристик. Сигнализация о срабатывании защиты, действующей на останов котла, необходима для соблюдения техники безопасности и предотвращения аварийных ситуаций. При выпуске воды из барабана, уровень воды в нем понижается, вследствие этого может быть нарушена циркуляция и вызван перегрев труб донных экранов. Если защита сработает без промедления, то возможно предотвратить выход из строя парогенератора. При уменьшении нагрузки парогенератора, интенсивность горения в топке снижается. Горение становится неустойчивым и может прекратиться. В связи с этим должна быть предусмотрена защита по погашению факела [2,3].

При измерении уровня воды H в барабанах паровых котлов в настоящее время применяются уровнемеры, работающие по принципу измерения разности давлений, создаваемых постоянным столбом жидкости в уравнительном сосуде и столбом жидкости в барабане котла. Двухкамерный, однокамерный или комбинированный уравнительный сосуд присоединяется к специальным штуцерам барабана котла или к штуцерам водомерного стекла. Камера переменного уровня прибора соединяется с паровым пространством барабана и плюсовой полостью уровнемера.

На рисунке 3 показана схема измерения уровня воды в барабане парогенератора дифманометром с использованием комбинированного двухкамерного уравнительного сосуда [4]. Согласно физическим процессам, происходящим в жидкости при изменении температуры и давления, уровень питательной воды S в барабане будет определяться по формуле:

$$S = \rho (H - h) \cdot \alpha, \quad (1)$$

где, ρ — плотность воды при нормальных условиях, h — высота столба питательной воды в барабане котла, H — высота столба питательной воды в конденсационном сосуде, $\acute{\alpha}$ — коэффициент относительной плотности воды:

$$\acute{\alpha} = \rho^1 / \rho,$$

где, ρ^1 — плотность воды в переходном состоянии.

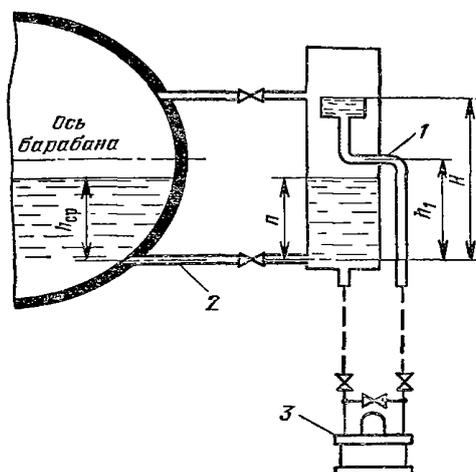


Рисунок 3 — Принципиальная схема измерения уровня воды в барабане дифманометром с использованием двухкамерного уравнительного сосуда

Такой уравнительный сосуд применяют на парогенераторах с давлением пара в барабане $p \leq 250 \text{ кгс/см}^2$ (25 МПа). Комбинированный сосуд отличается от двухкамерного тем, что нижняя часть столба воды H высотой h_1 находится в холодном состоянии, так как труба 1 не покрывается тепловой изоляцией. Высоту h_1 , измеряемую от центра отверстия в сосуде до центра трубы 2 принимают равной:

$$h_1 = 1,222(H - h_{cp}). \quad (2)$$

Разность давлений, создаваемая комбинированным уравнительным сосудом, которую измеряет дифманометр 3, определяется выражением:

$$\Delta p = [(H - h_1)\rho' + h_1\rho_e - h\rho' - (H - h)\rho'']g,$$

или

$$\Delta p = [(H - h)(\rho' - \rho'') + h_1(\rho_e - \rho')g], \quad (3)$$

где ρ' и ρ'' — плотность воды и пара в состоянии насыщения при давлении p , кг/м^3 ; ρ_e — плотность воды столба H , кг/м^3 ; g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

Пользуясь этим уравнением определяют разность давлений Δp_e , измеряемую дифманометром при верхнем уровне воды в барабане $H = h$, $\Delta p_e = h_1(\rho_e - \rho')g$. При нижнем уровне воды в барабане $h = 0$ выражение (2) принимает вид:

$$\Delta p = [H(\rho' - \rho'') + h_1(\rho_e - \rho')g]. \quad (4)$$

Значение Δp_e при верхнем уровне воды в барабане $H = h$ должно соответствовать нижнему пределу измерения $+N$ шкале вторичного прибора дифманометра. Значение Δp_n при нижнем уровне воды в барабане $h = 0$ соответствует на шкале прибора верхнему пределу измерения $-N$.

Очевидно, что показания уравнимера зависят от разности плотностей воды и пара ($\rho' - \rho''$), которая значительно изменяется с давлением пара или понижением температуры в барабане парогенератора. Вследствие этого дифманометры-уровнемеры не могут обеспечить надежный контроль уровня воды в барабане парогенераторов высокого давления при работе его с давлением пара ниже нормального, а также при пусках и остановках парогенераторов. Известно, что вследствие охлаждения воды или изменения давления, которое происходит и при наличии тепловой изоляции, на внешней поверхности его действительная средняя плотность воды в сосуде ρ_0 будет несколько больше, чем плотность воды в состоянии насыщения ρ' , принимаемая при расчете шкалы прибора. Поэтому уровень, показываемый вторичным прибором дифманометра, будет несколько занижен или завышен по сравнению с действительным уровнем воды в барабане (см. рисунок 3).

Таким образом, с целью повышения точности измерения уровня воды в барабане парогенератора необходимо проводить коррекцию по изменению давления ΔP , температуры ΔT и разности плотностей воды и пара $\Delta(\rho' - \rho'')$. Нами предложено представить контроль уровня жидкости в барабане H_δ в виде терминального функционала:

$$H_\delta = f(h_1, h_2(\Delta P), h_3(\Delta T), h_4(\Delta(\rho' - \rho''))) \quad (5)$$

где h_2, h_3, h_4 — весовые коэффициенты, отражающие погрешность вносимую динамикой давления, температуры и плотностей жидкости и газа соответственно. Предложенный функционал можно записать в виде многочлена:

$$H_\delta = h_1 + h_2(\Delta P) + h_3(\Delta T) + h_4(\Delta(\rho' - \rho'')), \quad (6)$$

решение которого позволит обеспечить контроль уровня жидкости в барабане котла тепловой электростанции путем многопараметрического измерения дестабилизирующих факторов.

Для сосуда, размеры которого известны, учтем погрешность, возникающую в результате перепада давления, которую определим из равенства:

$$h_2(\Delta P) = l\gamma' + L\gamma_T - H_\delta(\gamma' - \gamma'') - r\gamma'' + \Delta p_{1,к2} / m^2, \quad (7)$$

где ΔP — расчетный перепад давлений для текущего значения уровня в барабане, $к2/м^2$; l — длина горячей части трубки, $м$; L — длина холодной части трубки, $м$; γ_T — удельный вес воды в холодной части трубки при температуре окружающего воздуха $Т^0С$, $к2/м^2$; H_δ — текущее значение уровня в барабане, отсчитываемое от оси нижней врезки сосуда, $м$; γ', γ'' — удельный вес воды и пара соответственно при температуре насыщения, $к2/м^3$; r — расстояние между нижней врезкой в сосуд и трубкой слива, $м$; $\Delta p_{1,к2}$ — перепад давлений между плюсовой и минусовой камерами датчика, залитого холодным конденсатом, $к2/м^2$.

Об уровне H_δ в барабане можно судить по изменению температуры столба воды. Это позволит учесть, что вследствие охлаждения уровень воды в колонке оказывается ниже действительного уровня в барабане и разность между ними возрастает с увеличением давления и повышением уровня в барабане. Т.о., погрешность, возникающая в результате перепада давлений с учетом охлаждения горячей части трубки может быть определена по формуле:

$$h_2(\Delta P) = l\gamma^* + L\gamma_T - H_\delta(\gamma' - \gamma'') - r\gamma'' + \Delta p_{1,к2} / m^2, \quad (8)$$

где γ^* — средний удельный вес воды в горячей части плюсовой трубки, определенный при средней температуре воды $T_{cp}^0С$, $к2/м^2$.

Средняя температура воды в горячей части определится из уравнения:

$$T_{cp} = \frac{T' - \Delta T_a}{2},$$

$$\Delta T_a = (T' - T_c) \left(1 - \frac{1}{e^m}\right), \quad (9)$$

где T' — температура насыщения при данном давлении, °C; ΔT_a — разность между температурой насыщения и температурой нижней точки водомерной колонки, °C; T_c — температура окружающей среды, °C,

$$m = \frac{r}{(T' - T_c)c_p} \cdot \frac{H_6}{r - H_6},$$

где r — скрытая теплота парообразования, ккал/кг; c_p — средняя теплоемкость воды в интервале температур от T' до температуры нижней точки водомерной колонки, ккал/кг·°C. Весовой коэффициент, отражающий погрешность по температуре определим как:

$$h_3(\Delta T) = \frac{\Delta T_a}{T_{cp}}; \quad (10)$$

С увеличением уровня и давления в барабане разность между уровнем в барабане и водомерной колонке возрастает [5]. При этом коррекция только по давлению или только по температуре не обеспечивает достаточной точности измерения уровня воды в барабане мощных парогенераторов при меняющихся давлениях пара в широких пределах, т.к. изменение разности плотностей воды и пара $\Delta(\rho' - \rho'')$ не является линейной функцией давления (или температуры) пара в барабане [5].

Для определения плотности контролируемой среды в рабочих условиях предлагаем применение плотномеров, не изменяющих структуру потока. Точку отбора пробы газа расположим в верхней, а жидкостей — в нижней части горизонтального участка трубопровода. Корректировку уровня по показаниям плотномера предлагаем выполнить по формуле:

$$h_4(\Delta(\rho' - \rho'')) = \frac{\rho \cdot p}{p_p} = \frac{\rho \cdot p}{p - \Delta p_p} = \frac{\rho}{1 - \frac{\Delta p_p}{p}} = \rho \cdot c_p, \quad (11)$$

где $\frac{1}{1 - \frac{\Delta p_p}{p}} = c_p$ — поправочный коэффициент; ρ_0 — показания плотномера; p_p — давление

в чувствительном элементе плотномера; Δp_p — разность между давлениями на входе в колонку и в чувствительном элементе плотномера.

На рисунке 4 представлен алгоритм определения уровня жидкости в барабане с учетом дестабилизирующих факторов, который позволяет синтезировать структурную схему системы мониторинга уровня жидкости в барабане котла.

Предлагается структурная схема системы мониторинга уровня воды в барабане котла, которая приведена на рисунке 5:

Измерение уровня предлагается осуществлять дифманометром-уровнемером Д-У. Измерение плотности воды и пара плотномерами P' и P'' соответственно, давление — датчиком давления Д и температуру — датчиком температуры Т. Это даст возможность корректировки измеренных значений уровня с учетом всех влияющих параметров. В процессе обработки скорректированных величин в микропроцессорном блоке происходит их сравнение с граничными, и, в случае необхо-

димости, в блоках регулирования температуры, давления и плотности (БРТ, БРД, БРП соответственно) вырабатывается сигнал регулирования. Таким образом, с помощью органов управления барабаном (ОУБ) и котлом (ОУК) можно обеспечить постоянный контроль уровня в барабане, а следовательно — уменьшить количество аварийных остановов, снизить затраты на незапланированные запуски и восстановительные работы.

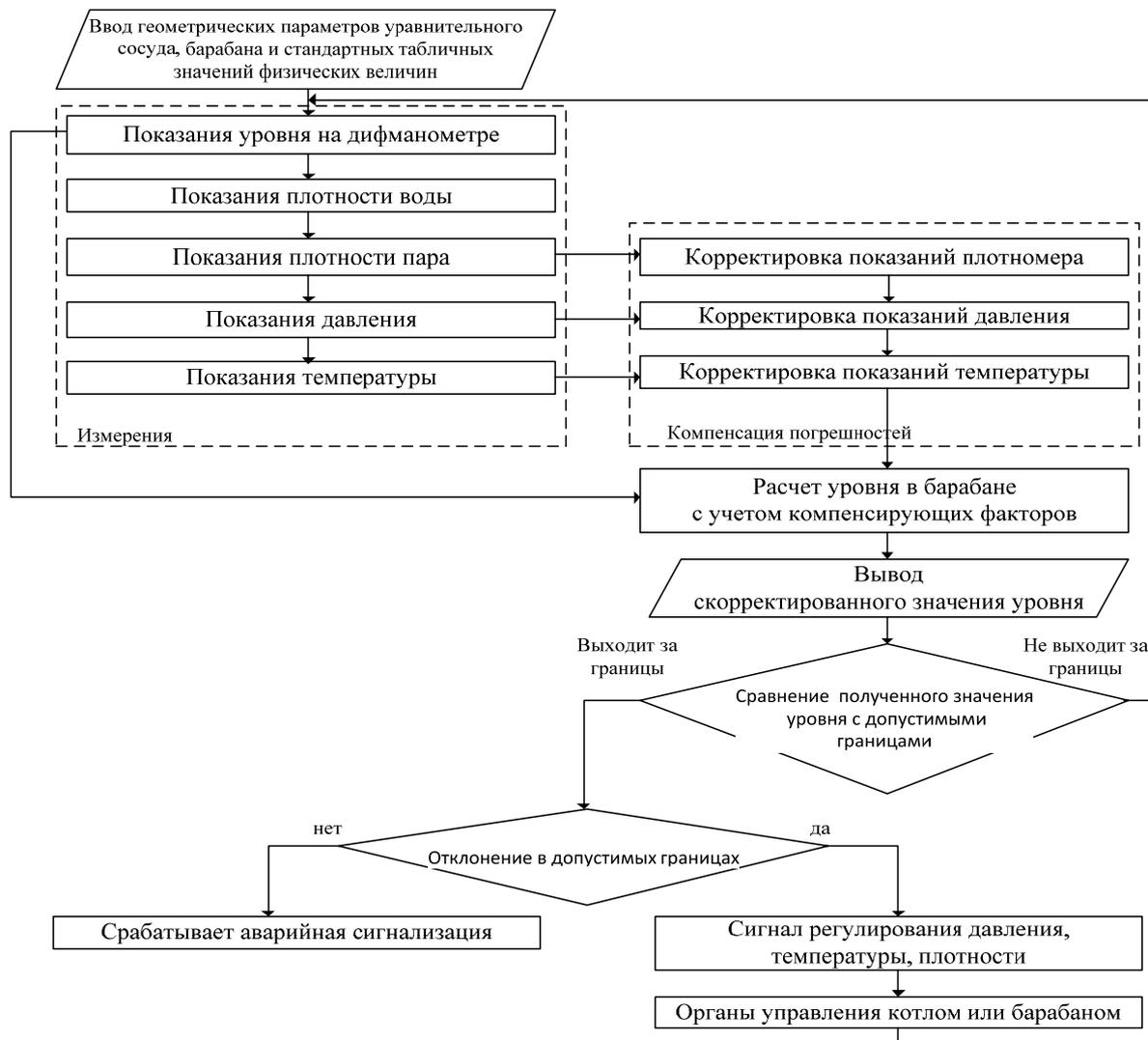


Рисунок 4 — Алгоритм определения уровня жидкости в барабане с учетом компенсирующих факторов

Выводы

1. Проведен анализ используемых в настоящее время средств измерения уровня воды в барабане котла, выявлены их недостатки.
2. Рассмотрена существующая математическая модель, определяющая уровень воды в барабане. Предложено ввести в нее коррекцию по температуре, давлению и разности плотностей воды и газа, что повысит точность измерений.
3. Предложен алгоритм определения уровня жидкости в барабане с учетом влияния дестабилизирующих факторов.
4. Предложена структурная схема компьютерной системы мониторинга уровня воды в барабане котла, применение которой позволит уменьшить количество аварийных остановов, а также снизить затраты на незапланированные запуски и восстановительные работы.

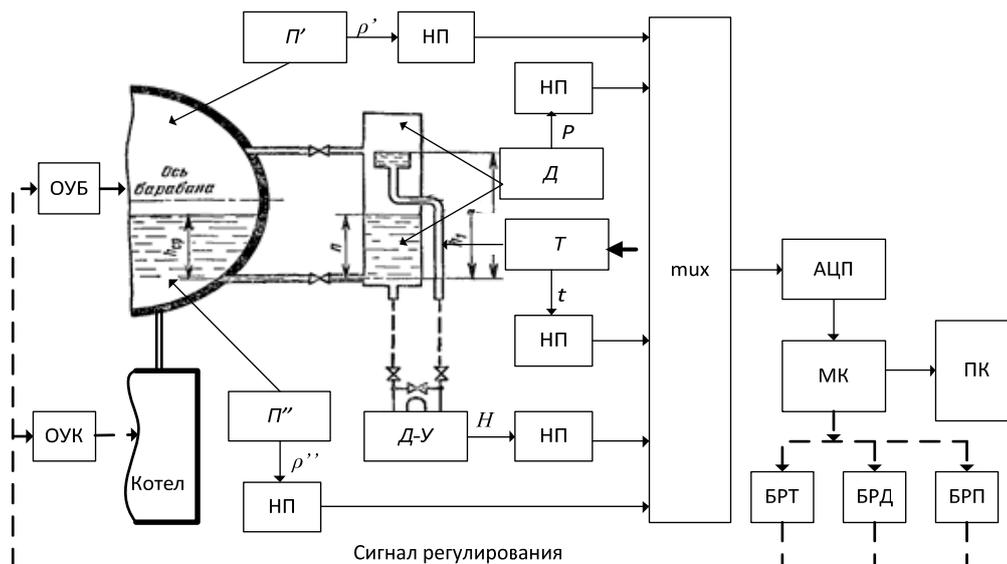


Рисунок 5 — Укрупненная структурная схема системы мониторинга уровня воды в барабане котла

Список использованной литературы

1. Цане С.В. Газотурбинные и парогенераторные установки тепловых электростанций / С.В. Цане. — М.: МЭИ, 2002. — 426 с.
2. Сидельковский Л.Н. Котельные установки промышленных предприятий / Л.Н. Сидельковский. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 390 с.
3. Резников М.И. Паровые котлы тепловых электростанций / М.И. Резников, Ю.М. Липов. М.: Энергоиздат, 1999. — 240 с.

Надійшла до редакції:
01.03.2012 р.

Рецензент:
д-р техн. наук, проф. Зорі А.А.

S. Avramenko, V. Tarasyuk. The liquid level monitoring computer system in the boiler drum. The existing means of measuring the level in the drum of the boiler. The factors affecting the accuracy of the measurement of: differential pressure, temperature and density difference between water and gas. Propose a structural scheme of a system for monitoring the liquid level in the drum of the boiler with the influence of these factors.

Keywords: power equipment, differential pressure gauge, steam, water circulation, equalizing vessel, correction, saturation temperature.

С.В. Авраменко, В.П. Тарасюк. Комп'ютерна система моніторингу рівня рідини в барабані котла. Розглянуто існуючі засоби вимірювання рівня в барабані котла. Визначено фактори, що впливають на точність вимірювання рівня: перепад тиску, температура і різниця густин води і газу. Запропоновано структурну схему системи моніторингу рівня рідини в барабані котла з урахуванням впливу компенсуючих факторів.

Ключові слова: енергоустаткування, дифманометр, парогенератор, циркуляція води, корекція, температура насичення.

© Авраменко С.В., Тарасюк В.П., 2012